

М.І. Нікітенко, Ю.Ф. Снежкін, Н.М. Сорокова
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЗНЕВОДНЕННЯ У КОНВЕКТИВНИХ СУШИЛЬНИХ УСТАНОВКАХ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

© Нікітенко М.І., Снежкін Ю.Ф., Сорокова Н.М., 2013

Проаналізовано перспективи використання водних бітумних емульсій для антикорозійного захисту об'єктів нафтогазового комплексу. Особливу увагу приділено методу отримання покриття на основі бітумно-полімерної емульсії. Наведено переваги використання бітумно-полімерних емульсій для антикорозійного захисту об'єктів нафтогазового комплексу. Наведено властивості покриття, отриманого з емульсійних композицій. Розроблено систему покриття на основі отриманого матеріалу. Зроблено висновок, що отримана система покриття може бути використана для антикорозійного захисту об'єктів нафтогазового комплексу.

Ключові слова: модифікована бітумна емульсія, латекс, система покриття.

The prospects of usage of water bitumen emulsion for anticorrosive protection of objects of oil and gas facilities are analyzed. Special attention is given to the method of obtaining the coating based on a polimer-bitumen emulsion. The advantages of the usage of polimer-bitumen emulsions for anticorrosive protection of objects of oil and gas facilities are given. The properties of coating obtained from emulsion compositions are shown. The coating system based on obtained material is developed. Conclusions that obtained coating system can be used for anticorrosive protection of objects of oil and gas facilities are made.

Key words: modified bitumen emulsion, latex, coating system.

Підвищення ефективності процесу сушіння пов'язане з механізацією та автоматизацією технологічного циклу зневоднення матеріалу. Тому для великомасштабних виробництв є актуальним перехід від сушарок періодичної до апаратів безперервної дії. Конвективні сушильні установки безперервної дії є найрозповсюдженішим типом сушарок під час сушіння формованих або волокнистих матеріалів, що містять вологу, яка важко видаляється.

Для розрахунку процесу сушіння в апаратах безперервної дії використовуються наближені балансові методи моделювання кінетики зневоднення капілярно-пористих матеріалів [1]. Вони вимагають значного обсягу експериментальної інформації і мають доволі невисоку точність. Погрішність такого моделювання зростає у разі, коли режим сушіння є змінним.

У цій роботі побудована математична модель і розроблений чисельний метод розрахунку динаміки сушіння пористих матеріалів для стрічкової сушильної установки безперервної дії.

У [2] на основі законів збереження і основних положень механіки деформованого тіла отримане диференціальне рівняння перенесення субстанції W (маси, імпульсу, енергії):

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(W\mathbf{w}) = -\text{div} \mathbf{j}_W + I_W - \frac{W}{1 + \varepsilon_V} \left[\frac{\partial \varepsilon_V}{\partial t} + \text{div}(\varepsilon_V \mathbf{w}) \right]. \quad (1)$$

За нормальних умов режим роботи сушарки безперервної дії є сталим, тобто у кожній точці апарата температура і об'ємні концентрації компонентів зневодненого матеріалу з часом не змінюються ($\partial W/\partial t = 0$, $\partial \varepsilon_V/\partial t = 0$), і швидкість переміщення матеріалу \mathbf{w}_L не залежить від часу.

Якщо швидкість руху компонентів матеріалу стосовно його кістяка дорівнює нулю, тобто перенесення енергії і маси речовини здійснюється дифузійно, рівняння (1) набуває вигляду

$$\mathbf{w}_L \operatorname{div} W = -\operatorname{div} \mathbf{j}_W + I_W - \frac{W}{1 + \varepsilon_V} \mathbf{w}_L \operatorname{div} \varepsilon_V. \quad (2)$$

За наявності фільтраційного тепломасоперенесення компоненти ψ зв'язаної речовини – рідина ($\psi = ж$), пара ($\psi = п$) і повітря ($\psi = в$) – рухаються стосовно кістяка тіла зі швидкістю \mathbf{w}_ψ , а стосовно корпусу апарата – зі швидкістю $\mathbf{w} = \mathbf{w}_L + \mathbf{w}_\psi$. Для цього випадку рівняння (1) можна записати у вигляді

$$\mathbf{w}_L \operatorname{div} W + \operatorname{div}(W \mathbf{w}_\psi) = -\operatorname{div} \mathbf{j}_W + I_W - \frac{W}{1 + \varepsilon_V} [\mathbf{w}_L \operatorname{div} \varepsilon_V + \operatorname{div}(\varepsilon_V \mathbf{w}_\psi)]. \quad (3)$$

Функція густини потоку \mathbf{j}_W субстанції W подається сумою дифузійної і фільтраційної складових $\mathbf{j}_W = \mathbf{j}_W^d + \mathbf{j}_W^\phi$. Густина дифузійного потоку маси компонента ψ зв'язаної речовини $\mathbf{j}_\psi^d = -D_\psi (\nabla U_\psi + \delta_\psi^T \nabla T)$, де D_ψ – ефективний коефіцієнт дифузії компонента ψ ; U_ψ – об'ємна концентрація компонента ψ ; δ_ψ^T – відносний коефіцієнт термодифузії компонента ψ . Густина дифузійного потоку енергії $\mathbf{j}^d = -\lambda \nabla T + \sum_\psi E_\psi \mathbf{j}_\psi^d$, де E_ψ – питома внутрішня енергія компонента ψ .

Коефіцієнти дифузії для рідкої $D_ж$, парової $D_п$ і повітряної $D_в$ фаз знаходять за формулами

$$D_ж = \gamma_{D_ж} [\exp(A_D / R_y T) - 1]^{-1} \text{ і } D_п = D_в = \gamma_{D_п} T^{3/2} / P_\Gamma,$$

де T – температура; R_y – універсальна газова стала; A_D – енергія активації для дифузійного процесу, $\gamma_{D_ж}$ і $\gamma_{D_п}$ – дифузійні коефіцієнти перенесення рідини і пари. Формула Нікітенко М.І. для $D_ж$ [3] у граничних випадках переходить в емпіричну формулу Арреніуса для твердих тіл і у формулу Ейнштейна – для рідких середовищ.

Густини фільтраційних потоків фаз обчислюються за співвідношеннями

$$\mathbf{j}_ж^\phi = U_ж \mathbf{w}_ж, \mathbf{j}_п^\phi = U_п \mathbf{w}_\Gamma, \mathbf{j}_в^\phi = U_в \mathbf{w}_\Gamma. \quad (4)$$

Швидкості фільтрації рідкої $\mathbf{w}_ж$ та газової \mathbf{w}_Γ фаз у цій точці тіла знаходять за формулою Дарсі:

$$\mathbf{w}_\psi = -\frac{K_0 K_\psi}{\eta_\psi} \nabla P_\psi, \psi = ж, \Gamma, \quad (5)$$

де K_0 – загальна проникність середовища; K_ψ – відносна проникність, η_ψ – динамічний коефіцієнт в'язкості; ∇P_ψ – градієнт тиску фази ψ .

Тиск газової і рідкої фаз у порах матеріалу визначається за співвідношеннями: $P_\Gamma = P_п + P_в$, $P_ж = P_\Gamma + P_к$. Парціальні тиски пари і повітря знаходять з рівняння стану $P_п = \rho_п RT / \mu_п$ і $P_в = \rho_в RT / \mu_в$, де $\rho_п$ і $\rho_в$ – парціальні густини пари і повітря у капілярах, $\rho_п = U_п / \Psi_\Gamma$ і $\rho_в = U_в / \Psi_\Gamma$. Об'ємна частка газової фази $\Psi_\Gamma = 1 - \Psi_\Gamma - \Psi_ж$, а об'ємна частка рідини – $\Psi_ж = U_ж / \rho_ж$. Капілярний тиск $P_к$ обчислюється [2], як середній капілярний тиск рідини у порах тіла за формулою

$$P_к = 2\sigma(T) \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\theta}{r} f(r) dr / \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \theta f(r) dr = \frac{2\sigma(T)}{r^*}, \quad (6)$$

де $\sigma(T)$ – коефіцієнт поверхневого натягу; r_{\min} , r_{\max} – мінімальний і максимальний радіуси капіляра; r^* – характеристичний параметр дисперсності розмірів пор, $r_{\min} < r^* < r_{\max}$; $f(r)$ – диференціальна функція розподілу пор за розмірами, яка визначається з умови: $\Pi = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f(r) dr$; $\theta(r, t) = 1 - (1 - \delta/r)^2$ –

об'ємна частка рідини у капілярі радіуса r у момент часу t ; δ – товщина конденсату. Вираз для θ отримано відношенням площі перетину капіляра, зайнятого рідиною, до загальної площі перетину.

Відносна об'ємна деформація ε_V може бути знайдена на основі рівняння термоконцентраційного деформування [4], якщо відомі функції T , $U_ж$, $U_п$, $U_в$.

Інтенсивність випаровування рідини на зовнішній поверхні тіла [5] пропорційна до різниці потоків рідини, що випаровується, і пари, яка на цій поверхні конденсується:

$$I = \gamma_c \left\{ \varphi_T \left(\exp \left[A / (R_y T|_{v=0}) \right] - 1 \right)^{-1} - \varphi_c \left(\exp \left[A / (R_y T_c) \right] - 1 \right)^{-1} \right\}, \quad (7)$$

де $\gamma_c = \epsilon \rho_{ж} \delta^* / 4$ – коефіцієнт поверхневого випаровування; ϵ – коефіцієнт випромінювання; δ^* – середня довжина дифузійного переміщення активізованої частки у середині конденсованого тіла; φ_T – вологість парогазової суміші, якій відповідно до ізотерми сорбції відповідає об'ємна концентрація $U_{ж}$ у цій точці пористого тіла; v – нормаль до граничної поверхні; T_c і φ_c – температура і відносна вологість зовнішнього середовища; A – енергія активації.

Значення φ_T може бути визначене з рівняння ізотерми десорбції або на основі формули (5), отриманої для рівноважної товщини шару конденсату δ на поверхні твердого тіла у середовищі зі ступенем насичення ϕ і парціальним тиском пари $P_{п}$:

$$\delta = \delta^* \bar{\delta} = \delta^* (1 - \sqrt{1 - P_{п} / P_{н}}) = \delta^* (1 - \sqrt{1 - \phi}), \quad (8)$$

звідки $\varphi_T = \bar{\delta}(2 - \bar{\delta})$, де $\bar{\delta}$ – відносна товщина конденсату, $\bar{\delta} = \delta / \delta^*$ за $0 < \delta < \delta^*$ і $\bar{\delta} = 1$ за $\delta > \delta^*$.

У другому періоді сушіння інтенсивність випаровування знаходять з рівняння збереження енергії для елементарного об'єму, що примикає до граничної поверхні за умови, що уся рідина, яка підходить до цієї поверхні від внутрішніх шарів тіла:

$$I = -D_{ж} \frac{\partial U_{ж}}{\partial x} \Big|_{v=0}. \quad (9)$$

Інтенсивність випаровування I_V рідини в одиничному об'ємі пористого тіла:

$$I_V = IS, \quad (10)$$

де S – сумарна площа контакту рідкого і газоподібного середовищ у частково заповнених рідиною капілярах. Для знаходження функції S отримано формулу [6]:

$$S = \frac{2\sqrt{1 - \phi_T}}{\rho_{ж} \delta^*} \frac{\partial U_{ж}}{\partial \varphi_T}. \quad (11)$$

Похідна $\partial U_{ж} / \partial \varphi_T$ визначається диференціюванням рівняння ізотерми десорбції. Якщо ізотерма десорбції задана у вигляді $U_{ж} = U_{\max} \varphi_T^g$, де $g = \text{const}$, то $\frac{\partial U_{ж}}{\partial \varphi_T} = U_{\max} g \varphi_T^{g-1}$, а

$$S = \frac{2U_{\max} g}{\rho_{ж} \delta^*} \varphi_T^{g-1} \sqrt{1 - \phi_T}.$$

Під час сушіння площа S змінюється від мінімального значення для вологого тіла за $\delta \rightarrow \delta^*$, до максимального значення, що відповідає сухому пористому тілу за $U_{ж} \rightarrow 0$. За відсутності рівноваги в системі φ_T відрізняється від відносної вологості ϕ газу у порах тіла.

Відповідно до співвідношень (7), (10) і (11), вираз для інтенсивності випаровування на поверхнях контакту рідини і газу в частково заповнених капілярах за умови, що температури різних фаз у кожній точці пористого тіла збігаються, можна записати у такому вигляді:

$$I_V = \gamma_c \frac{2\sqrt{1 - \phi_T}}{\rho_{ж} \delta^*} \frac{\partial U_{ж}}{\partial \varphi_T} \left[\exp \left(\frac{A}{R_y T} \right) - 1 \right]^{-1} (\varphi_T - \phi). \quad (12)$$

Стрічкова сушарка являє собою коридор, у якому розміщений стрічковий транспортер, що несе з постійною швидкістю w_L матеріал, який сушиться. Переважно ширина стрічки і довжина транспортера набагато більша від висоти шару матеріалу на стрічці. Введемо нерухому систему декартових координат так, що вісь x перпендикулярна до робочої поверхні стрічки, а вісь z – рівнобіжна до вектора w_L . Для випадку, коли перенесення енергії і маси речовини здійснюється дифузійно і перехресними ефектами перенесення можна знехтувати, рівняння перенесення субстанції (2) запишеться у вигляді

$$w_L \frac{\partial W}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_W \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_W \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_W \frac{\partial W}{\partial z} \right) + I_W - \frac{W}{1 + \varepsilon_V} w_L \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}. \quad (13)$$

Розрахунки показують, що за $w_L X / \lambda_W > 10$, де X – товщина шару матеріалу, величина $\partial j_{Wz} / \partial z$ набагато менша порівняно з членом $w_L \partial W / \partial z$. Якщо ширина стрічки Y доволі велика порівняно з X , можна знехтувати перенесенням субстанції уздовж осі y . Для капілярно-пористих тіл, об'єм яких під час сушіння майже не змінюється і $\varepsilon_V = 0$, (13), переходить в рівняння параболічного типу:

$$w_L \frac{\partial W}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_W \frac{\partial W}{\partial x} \right) + I_W. \quad (14)$$

Система рівнянь тепло- і масообміну за безперервного дифузійного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів будується на основі рівнянь (13), (14) і має такий вигляд:

$$w_L \frac{\partial U_{ж}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{ж} \left(\frac{\partial U_{ж}}{\partial x} + \delta_{ж} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] - I_V - \frac{U_{ж}}{1 - \varepsilon_V} w_L \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}; \quad (15)$$

$$w_L \frac{\partial U_{п}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{п} \left(\frac{\partial U_{п}}{\partial x} + \delta_{п} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + I_V - \frac{U_{п}}{1 - \varepsilon_V} w_L \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}; \quad (16)$$

$$w_L \frac{\partial U_{в}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{в} \left(\frac{\partial U_{в}}{\partial x} + \delta_{в} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] - \frac{U_{в}}{1 - \varepsilon_V} w_L \frac{\partial \varepsilon_V}{\partial z}; \quad (17)$$

$$c_{эф} w_L \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \sum c_{\psi} D_{\psi} \left(\frac{\partial U_{\psi}}{\partial x} + \delta_{\psi} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \frac{\partial T}{\partial x} - L I_V, \quad \psi = ж, п, в, \quad (18)$$

де $c_{эф} = c_T U_T + c_{ж} U_{ж} + c_{п} U_{п} + c_{в} U_{в}$ і $\lambda_{эф} = \lambda_T U_T / \rho_T + \lambda_{ж} U_{ж} / \rho_{ж} + \lambda_{п} U_{п} / \rho_{п} + \lambda_{в} U_{в} / \rho_{в}$ – ефективні значення теплоємності і теплопровідності пористого тіла; L – питома теплота випаровування.

На вході в сушильну камеру усі фізичні параметри матеріалу і теплоносія вважаються відомими. Визначення параметрів сушильного агента в перетині $z + \Delta z$ проводиться у такій послідовності. Зміна тиску ΔP_c на відрізок Δz внаслідок тертя визначається за формулою

$$\Delta P_c = P_c(z + \Delta z) - P_c(z) = -\lambda_{тр} \rho_c(z) [w_c(z) - w_L]^2 \Delta z / 2d_{екв}. \quad (19)$$

Коефіцієнт тертя $\lambda_{тр}$ залежить від режиму руху газу [7]. Еквівалентний діаметр $d_{екв} = 2S_k / P_k = XY / (X + Y)$, де $S_k = XY$ – площа перетину каналу; $P_k = 2(X + Y)$ – периметр перетину каналу.

Витрати парової і повітряної складових теплоносія через перетин $z + \Delta z$ дорівнюють

$$G_{п}(z + \Delta z) = G_{п}(z) + I + \beta_{п} [\rho_{п}(z, X) - \rho_{пс}(z)], \quad G_{в}(z + \Delta z) = G_{в}(z) + \beta_{в} [\rho_{в}(z, X) - \rho_{вс}(z)], \quad (20)$$

де $\rho_{п}(z, X)$, $\rho_{в}(z, X)$ і $\rho_{пс}(z)$, $\rho_{вс}(z)$ – парціальні густини пари і повітря у матеріалі та у теплоносії.

Загальна витрата сушильного агента $G_c(z + \Delta z)$ визначається сумою витрат його компонентів:

$$G_c(z + \Delta z) = G_{п}(z + \Delta z) + G_{в}(z + \Delta z). \quad (21)$$

Температура сушильного агента $T_c(z + \Delta z)$ визначається з рівняння балансу енергії для елементарного об'єму $\Delta V = S_k \Delta z$:

$$\begin{aligned} G_{п}(z) c_{п} T_c(z) + G_{в}(z) c_{в} T_c(z) - a [T_c(z + \Delta z) - T(z + \Delta z, X)] Y \Delta z = \\ = G_{п}(z + \Delta z) c_{п} T_c(z + \Delta z) + G_{в}(z + \Delta z) c_{в} T_c(z + \Delta z), \end{aligned} \quad (22)$$

де $c_{п}$, $c_{в}$ – теплоємності пари і повітря.

Звідки

$$T_c(z + \Delta z) = \left\{ [G_{п}(z) c_{п} + G_{в}(z) c_{в}] T_c(z) + \alpha T(z + \Delta z, X) Y \Delta z \right\} / [G_{п}(z + \Delta z) c_{п} + G_{в}(z + \Delta z) c_{в} + \alpha Y \Delta z]. \quad (23)$$

Температура на поверхні матеріалу $T(z + \Delta z, X)$ відома з розв'язку системи (15) – (18).

Відповідно до рівнянь стану і нерозривності для пари і повітря швидкість сушильного агента $w_c(z + \Delta z)$ визначається за формулою

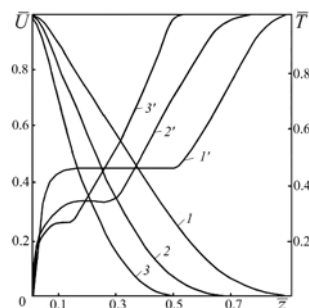
$$w_c(z + \Delta z) = \frac{R_y T_c(z + \Delta z)}{S_k P_c(z + \Delta z)} \left(\frac{G_{п}(z + \Delta z)}{\mu_{п}} + \frac{G_{в}(z + \Delta z)}{\mu_{в}} \right). \quad (24)$$

Парціальні густини пари $\rho_{\text{пс}}$ і повітря $\rho_{\text{вс}}$ у сушильному агенті в перетині $z+\Delta z$ камери знаходять з рівняння нерозривності:

$$\rho_{\text{пс}}(z+\Delta z) = G_{\text{п}}(z+\Delta z)/w_{\text{с}}(z+\Delta z)S_{\text{к}}, \quad \rho_{\text{вс}}(z+\Delta z) = G_{\text{в}}(z+\Delta z)/w_{\text{с}}(z+\Delta z)S_{\text{к}}. \quad (25)$$

Парціальні тиски компонентів сушильного агента $P_{\text{пс}}(z+\Delta z)$ і $P_{\text{вс}}(z+\Delta z)$ отримують з рівняння стану для компонентів.

Представлена математична модель дифузійного тепломасоперенесення і фазових перетворень за безперервного сушіння пористих тіл є істотно нелінійною. Для її реалізації, на основі тришарової явної різницевої схеми Нікітенко М.І. [3], був розроблений чисельний метод. На рисунку показані результати чисельних експериментів, що свідчать про адекватність математичної моделі і ефективність методу її розрахунку.



Залежність відносних середніх значень температури шару керамічного матеріалу $\bar{T} = (\bar{T}(z,t) - T_0)/(T_c - T_0)$ і об'ємної концентрації рідини $\bar{U} = \bar{U}_{\text{ж}}(z,t)/U_{\text{ж}0}$ від відносної довжини стрічки $\bar{z} = z/z_{\text{max}}$: 1, 1' – $T_c = 55^\circ\text{C}$; 2, 2' – $T_c = 65^\circ\text{C}$; 3, 3' – $T_c = 80^\circ\text{C}$.

1. Рудобаїта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
2. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Математическое моделирование тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки с целью оптимизации процесса сушки термолабильных материалов // ИФЖ. – 2005. – Т. 78, № 1. – С. 74 – 87.
3. Никитенко Н.И. Проблемы радиационной теории тепло- и массопереноса в твердых и жидких средах // ИФЖ. – 2000. – Т. 73, № 4. – С. 851 – 860.
4. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. – К.: Наук. думка. – 1983. – 352 с.
5. Никитенко Н.И. Исследование динамики испарения конденсированных тел на основе закона интенсивности спектрального излучения частиц // ИФЖ. 2002. – Т.75, № 3. – С. 128–134.
6. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокова Н.Н. Развитие теории и методов расчета динамики сорбции и десорбции // ИФЖ. – 2010. – Т. 83, № 3, – С. 779–789.
7. Шлипченко З.С. Насосы, компрессоры и вентиляторы. – К.: Техника, 1976. – 367 с.